



TITLE:

弾性体の局所変位観測に基づくモデルベース外力・変形推定

AUTHOR(S):

中尾, 恵; 松田, 哲也

CITATION:

中尾, 恵 ...[et al]. 弾性体の局所変位観測に基づくモデルベース外力・変形推定. VR医学会学術大会抄録集(第17回大会) 2017, 17: OP2-3.

ISSUE DATE:

2017-08

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/227821>

RIGHT:

日本VR医学会の許可を得て登録しています.; 許諾条件により本文は2018-08-01に公開.

弾性体の局所変位観測に基づくモデルベース外力・変形推定

中尾 恵¹⁾, 松田 哲也¹⁾

1) 京都大学大学院 情報学研究科

1. はじめに

人間は弾性体の変形を観測することで、外力の大きさや作用点の位置を推測することができる。例えば、外科手術においては、臓器の局所的な変位観測に基づいて、臓器や脈管に及ぼされる外力を推定しつつ手技が遂行される。特に、内視鏡手術やロボット手術では臓器が部分的にしか視認できず、臓器形状のごく一部の観測であっても外力を適切に制御することが求められる。従来研究において、術中臓器の計測装置の開発や、変形推定の試みは多くみられるが^{1), 2)}、部分変位観測のみから弾性体の力学的な状態の理解を目指した研究は知られていない。

手術時に外力が臓器に及ぼされる領域は、術具等による把持部や脈管・癒着等との接合部に限られる。本研究ではこの力学状態に着眼し、弾性体に及ぼされる外力にスパース性を仮定する。ここでのスパースとは、外力が及ぼされる領域が弾性体全体の体積に比べて十分小さい状態を指すこととする。

本研究では、弾性体の局所変位から外力及び変形をモデルベースで再構成する方法³⁾を提案した。提案方法は、スパース再構成と有限要素法の枠組みに基づいて定式化される。本稿では、新たに平板形状の弾性体を対象として、異なる観測条件における外力・変形推定性能の評価を行ったので報告する。

2. 局所変位観測に基づく外力・変形推定方法

提案方法では、推定対象の臓器形状と弾性率、固定条件が既知の条件の下で、一部の変位を入力として弾性体に加えられた外力と作用点の位置、全体の変形を再構成する。モデルの各頂点に加わる力を \mathbf{f} 、変位を \mathbf{u} 、剛性マトリクスを \mathbf{K} とすると、微小変形時の安定状態において、線形の剛性方程式 $\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{f} = \mathbf{L}\mathbf{f}$ が成り立つ。

観測頂点に対する添え字を o 、非観測点に対する添え字を i とし、剛性方程式のブロック分割を行うと、部分観測に基づく外力推定問題は式(1)のような劣

決定系の方程式として記述される。

$$\mathbf{u}_o = [\mathbf{L}_{oo} \mid \mathbf{L}_{oi}] \begin{bmatrix} \mathbf{f}_o \\ \mathbf{f}_i \end{bmatrix} = \mathbf{L}_o \mathbf{f} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{L}_o = [\mathbf{L}_{oo} \mid \mathbf{L}_{oi}]$ である。式(1)は一般には不良設定問題であるが、 \mathbf{f} は非零要素が少ない、スパースなベクトルであると仮定しているため、L1 ノルム最小化⁴⁾により、一定誤差内で解を算出可能である。すなわち、式(2)に基づいて \mathbf{f} を求める。

$$\mathbf{f}^* = \underset{\mathbf{f}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{u}_o - \mathbf{L}_o \mathbf{f}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{f}\|_1 \quad (2)$$

ここで、 λ はスパース係数である。求めた \mathbf{f}^* を用いて剛性方程式に基づいて変位 \mathbf{u} を算出することによって全体の変形も再構成できる。

3. 実験と結果

提案方法による外力及び変形の推定性能を確認するために、3D プリンティングによって作製した 120mm×120mm×10mm の平板形状の弾性体（ヤング率:217kPa）を模した 338 頂点のモデルを作成し、一端を固定した状態で一部を把持した引張変形をシミュレートして真値とした。局所観測として図 1 に示す P1, P2, P3, P4, P5 を中心した一定範囲内を観測する局所観測と、頂点をランダムに観測するランダム観測の計 6 通りの観測パターンを用意し、全体の 5% から 100% まで観測頂点の割合を変化させつつ、外力、内部応力及び変形の再構成を試みた。式(1)の求解には Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM)⁵⁾を用いた。 λ は経験的に 0.1 とした。

30%ランダム観測の場合の推定結果の一例を図 2 に示す。各頂点における外力、内部応力、位置の真値との RMSE(Root Mean Square Error)はそれぞれ 1.515N, 0.615 MPa, 0.014 mm となった。各観測条件において観測頂点数を変化させた場合の推定性能を図 3 に示す。局所観測よりもランダム観測の方が小さな誤差となることが確認された。局所観測の場合は、作用点に近い領域を観測した方がより小さな誤

OP2-3

第17回日本VR医学会学術大会 2017年8月26日

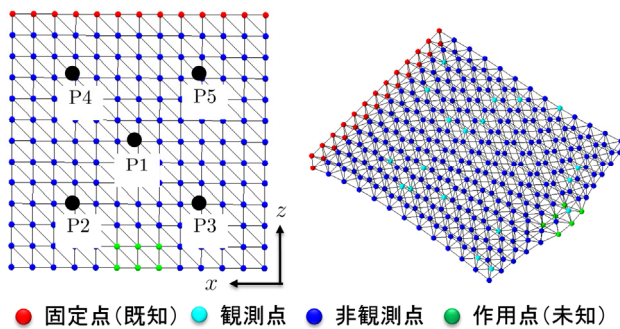


図 1. 局所観測パターンとランダム観測 (10%)

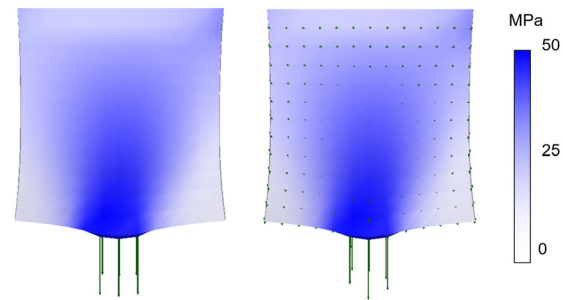


図 2. ランダム変位観測 (30%) の場合の外力・変形・応力分布 推定結果 (左: 真値, 右: 推定結果)

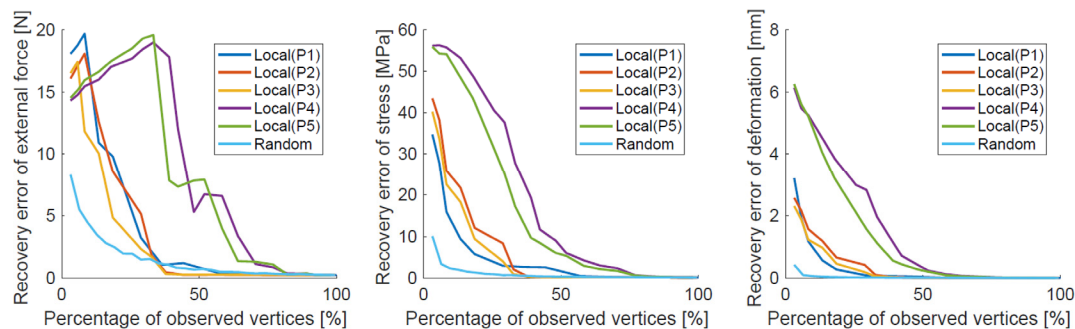


図 3. 6通りの観測方法における観測頂点数と推定誤差の関係 (左: 外力, 中央: 応力分布, 右: 位置)

差となり、作用点から遠い領域を観測した場合は、観測頂点数の増加に反して誤差が大きくなる場合も見られた。

4. おわりに

本稿では、平板形状のモデルを用いて提案するモデルベース外力・変形推定方法の性能を確認した。現状では基礎的な数値実験にとどまっているため、より複雑なモデルや実物体を用いた検証、弾性率推定方法⁵⁾との連携に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、科研費補助金 基盤研究 B「臓器変形・力学特性のスパースモデリング及び術中推定に関する研究」(課題番号: 15H03032) の助成による。

参考文献

- 1) L. Ocuin, A. Tsung, Robotic liver resection for malignancy: Current status, oncologic outcomes, comparison to laparoscopy, and future applications. J Surg Oncol. 112, pp. 295–301, 2015.
- 2) M. Nakao, Y. Oda, K. Taura, and K. Minato, "Direct

volume manipulation for visualizing intraoperative liver resection process", Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 113, No. 3, pp. 725-735, Mar 2014.

- 3) R. Sakata, M. Nakao, T. Matsuda, "Estimation of external forces on the basis of local displacement observations of an elastic body", Advanced Biomedical Engineering, Vol. 6, pp. 21-27, 2017.
- 4) E. Candès, M. Wakin, An introduction to compressive sampling, IEEE Signal Process Mag. 25, pp. 21-30, 2008.
- 5) N. Parikh and S. Boyd, Proximal algorithms, Foundations and Trends in Optimization, Vol. 1, No. 3, pp.123-231, 2013.
- 6) M. Morita, M. Nakao, T. Matsuda, Elastic modulus estimation based on local displacement observation of elastic body, Proc. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp.2138-2141, 2017.